کپسوله سازی آنتی بیوتیک ها با نانوذرات برای مقابله با باکتری ها: روش ها ، مزایا و چالش ها

علیرضا کاظم نژاد دهکاء* – مبینا زخیرف– مبینا وجدانی چوشلی– فاطمه رستمی لیافوئی

گروه بیوتکنولوژی ،واحد لاهیجان،دانشگاه آزاد اسلامی،لاهیجان،ایران.

چکیده

افزایش مقاومت باکتریایی و کاهش اثربخشی بسیاری از آنتی‌بیوتیک‌ها، نیاز به راهکارهای نوین در زمینه تحویل دارو را برجسته کرده است. این مقاله مروری به بررسی تازه‌ترین پیشرفت‌ها در کپسوله‌سازی آنتی‌بیوتیک‌ها با استفاده از نانوذرات برای مقابله با باکتری‌ها پرداخته است. ابتدا انواع اصلی نانوذرات مانند لیپوزوم‌ها، نانوذرات پلیمری از جمله PLGA و کیتوزان، نانوذرات لیپیدی جامد، نانوذرات فلزی مانند نقره و طلا، نانوذرات سیلیکایی و دندریمرها، همراه با مکانیسم‌های مختلف کپسوله‌سازی از قبیل محبوس‌سازی فیزیکی، جذب سطحی، اتصال کووالانسی و سامانه‌های پاسخ‌گو به محرک‌ها، شرح داده شده‌اند .در ادامه، اثرات فارماکوکینتیکی و فارماکودینامیکی کپسوله‌سازی بررسی شده که شامل افزایش پایداری داروها، آزادسازی کنترل‌شده، تحویل هدفمند به بافت‌ها و سلول‌های آلوده، و بهبود نفوذ به بیوفیلم‌ها می‌شود .یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از نانوحامل‌ها قادر است سمیت سیستمیک را کاهش داده و غلظت مؤثر دارو را در محل عفونت افزایش دهد .اما در عین حال، چالش‌های مهمی نیز وجود دارد؛ از جمله مسائل مربوط به سمیت و ایمنی طولانی‌مدت نانوذرات، پایداری فیزیکی و شیمیایی فرمولاسیون‌ها، دشواری تولید در مقیاس صنعتی، نبود روش‌های استاندارد یکپارچه برای ارزیابی، پیچیدگی‌های زیست‌فناوری و ملاحظات مقرراتی .در پایان، چشم‌اندازهایی برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد شده‌اند .این موارد شامل توسعه سامانه‌های چندکاره که ترکیباتی از آنتی‌بیوتیک‌ها با عوامل ضدبیوفیلم یا ایمونومدولاتور باشند، انجام مطالعات جامع پیش‌بالینی و بالینی، و ایجاد چارچوب‌های استاندارد جهت سنجش ایمنی و کارایی نانوحامل‌ها است .هدف این بررسی ارائه یک دیدگاه کامل از ظرفیت‌ها و چالش‌های پیش رو در مسیر ترجمه فناوری نانوکپسوله‌سازی آنتی‌بیوتیک‌ها به عرصه کاربردهای بالینی است.

کلیدواژه‌ها: نانوذرات، کپسوله‌سازی، آنتی‌بیوتیک، بیوفیلم، تحویل هدفمند، مقاومت باکتریایی، ایمنی

Encapsulation of antibiotics with nanoparticles for bacterial control: methods, advantages and challenges

Alireza Kazemnezhad Dehka* – Mobina Zakhirof – Mobina Vejdani Choshali –Fatemeh Rostami Liafoei

Department of Biotechnology,La.C.,Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Abstract

The increase in bacterial resistance and the decrease in the effectiveness of many antibiotics have highlighted the need for new drug delivery strategies. This review article reviews the latest advances in the encapsulation of antibiotics using nanoparticles for bacterial control. First, the main types of nanoparticles such as liposomes, polymeric nanoparticles including PLGA and chitosan, solid lipid nanoparticles, metallic nanoparticles such as silver and gold, silica nanoparticles and dendrimers are described, along with various encapsulation mechanisms such as physical entrapment, surface adsorption, covalent attachment and stimuli-responsive systems. Next, the pharmacokinetic and pharmacodynamic effects of encapsulation are investigated, including increased drug stability, controlled release, targeted delivery to infected tissues and cells, and improved penetration into biofilms. The findings indicate that the use of nanocarriers can reduce systemic toxicity and increase the effective drug concentration at the site of infection. However, there are also important challenges; These include issues related to the long-term toxicity and safety of nanoparticles, the physical and chemical stability of the formulations, the difficulty of industrial-scale production, the lack of standardized unified methods for evaluation, biotechnological complexities, and regulatory considerations. Finally, some perspectives for future research are suggested. These include the development of multifunctional systems that are combinations of antibiotics with antibiofilm or immunomodulatory agents, conducting comprehensive preclinical and clinical studies, and establishing standard frameworks for assessing the safety and efficacy of nanocarriers. The aim of this review is to provide a comprehensive view of the potential and challenges ahead in translating antibiotic nanoencapsulation technology into clinical applications.

Keywords: nanoparticles, encapsulation, antibiotics, biofilm, targeted delivery, bacterial resistance, safety

References

Pandey, R. P., Mukherjee, R., Priyadarshini, A., Gupta, A., Vibhuti, A., Leal, E., ... & Lyu, X. (2021). Potential of nanoparticles encapsulated drugs for possible inhibition of the antimicrobial resistance development. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *141*, 111943.

Cheow, W. S., & Hadinoto, K. (2010). Enhancing encapsulation efficiency of highly water-soluble antibiotic in poly (lactic-co-glycolic acid) nanoparticles: Modifications of standard nanoparticle preparation methods. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *370*(1-3), 79-86.

Taheri, M., Arabestani, M. R., Kalhori, F., Soleimani Asl, S., Asgari, M., & Hosseini, S. M. (2024). Antibiotics-encapsulated nanoparticles as an antimicrobial agent in the treatment of wound infection. *Frontiers in Immunology*, *15*, 1435151.

Gao, W., Thamphiwatana, S., Angsantikul, P., & Zhang, L. (2014). Nanoparticle approaches against bacterial infections. *Wiley interdisciplinary reviews: nanomedicine and nanobiotechnology*, *6*(6), 532-547.

Mba, I. E., & Nweze, E. I. (2021). Nanoparticles as therapeutic options for treating multidrug-resistant bacteria: research progress, challenges, and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *37*(6), 108.

AlQurashi, D. M., AlQurashi, T. F., Alam, R. I., Shaikh, S., & Tarkistani, M. A. M. (2025). Advanced nanoparticles in combating antibiotic resistance: current innovations and future directions. *Journal of Nanotheranostics*, *6*(2), 9.

Dube, E., & Okuthe, G. E. (2025). Biobased Organic Nanoparticles: A Promising Versatile Green Tool for Novel Antimicrobial Agents for Improved Safety. *International Journal of Food Science*, *2025*(1), 7955106.

Nasr, M. M., Pourmadadi, M., Yazdian, F., Rashedi, H., Rahdar, A., & Aboudzadeh, M. A. (2025). Nanoparticle-Based Tetracycline Delivery Systems: Advancing Therapeutic Effectiveness and Tackling Antibiotic Resistance. *Particle & Particle Systems Characterization*, e00036.